

**А.П. КУСЯК, С.П. ТУРАНСЬКА, канд. хім. наук, А.Л. ПЕТРАНОВСЬКА,
П.П. ГОРБИК, докт. фіз.-мат. наук, професор**

Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка Національної академії наук України,
вул. Генерала Наумова 17, Київ 03164, Україна

АДСОРБЦІЯ ЦИС-ДИХЛОРДІАМІНПЛАТИНИ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ НАНОКОМПОЗИТАМИ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ (TiO_2 , Al_2O_3)

Досліджено процеси хімічного модифікування поверхні нанорозмірного однодоменного магнетиту тетраетоксисиланом, н-бутилортотитанатом та ізопропілатом алюмінію. Синтезовано наноккомпозити $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ і $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ на основі магнетиту, вивчено їх адсорбційні властивості щодо комплексів *цис*-дихлордіамінплатини в залежності від хімічної природи поверхні наноструктур. Вивчено ізотерми та кінетику адсорбції комплексів *цис*-дихлордіамінплатини, в перерахунку на іони Pt^{2+} . Результати досліджень можуть бути використані при створенні магнітокерованих адсорбентів медико-біологічного і технічного призначення, зокрема, для вилучення малих концентрацій комплексів Pt^{2+} .

Ключові слова: адсорбція, *цис*-дихлордіамінплатина, магнетит, магніточутливі поліфункціональні наноккомпозити, магнітокеровані адсорбенти.

Розробка методів синтезу та використання магнітокерованих адсорбентів у галузях виробництва, медицини, біотехнології, екології є актуальним напрямком розвитку сучасної нанотехнології [1]. Модифікування поверхні магніточутливих нанорозмірних носіїв дозволяє керувати їх адсорбційними властивостями, біосумісністю та реалізувати концепцію хімічного конструювання наноккомпозитів з багаторівневою ієрархічною архітектурою та функціями медико-біологічних нанороботів (розпізнавання мікробіологічних об'єктів у біологічних середовищах; цільової доставки лікарських препаратів до клітин- та органів-мішеней і депонування; комплексної терапії хіміо-, імуні-, радіологічними-, гіпертермічними методами та діагностики в режимі реального часу, адсорбційний збір рештків клітинного розкладу та їх видалення з організму за допомогою зовнішнього магнітного поля [2-6]. Вказані підходи відображують принципово нові напрямки створення лікарських засобів комплексної дії для новітньої медицини, зокрема, онкології.

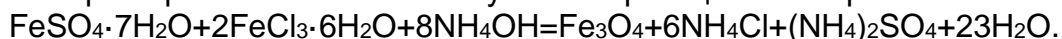
Застосування в сучасній онкотерапії препаратів на основі *цис*-дихлордіамінплатини, зокрема *цис*платину, як одного з основних протипухлинних лікарських засобів, призводить до накопичення в організмі пацієнтів вказаного діючого компонента, що викликає низку тяжких токсико-алергічних реакцій. Тому пошук шляхів адсорбційного вилучення з організму катіонів Pt^{2+} та інших важких металів для детоксикації організму є надзвичайно важливим. Крім того, платина є одним із найбільш дорогоцінних металів, тому її збір і концентрування з технологічних відходів та лікарських препаратів, що втратили придатність, є економічно вигідними.

Дана робота присвячена розробці новітніх магніточутливих адсорбентів, перспективних для ефективного вилучення біоактивних комплексів платини з біологічних та технічних середовищ, і є актуальною як з наукової, так і прикладної точок зору. Оскільки в медичних застосуваннях *цис*-дихлордіамінплатина використовується у невеликих концентраціях, особливий інтерес сьогодні виявляється до розробок біосумісних адсорбентів, здатних до ефективного вилучення саме при малих концентраціях вказаного препарату.

Метою роботи є синтез магніточутливих наноккомпозитів $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$, $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ і $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ на основі нанорозмірного однодоменного магнетиту (Fe_3O_4) та вивчення їх адсорбційних властивостей щодо комплексів *цис*-[дихлордіамінплатини](#) (II).

Синтез нанорозмірного магнетиту

Нанорозмірний магнетит синтезували за реакцією Елмора:



Методами растрової електронної мікроскопії встановлено, що частинки магнетиту характеризувались розмірами 3 – 23 нм і еліпсоїдною формою. Їх середній розмір залежав від умов синтезу. Питома поверхня магнетиту, визначена за тепловою десорбцією аргону, складала $S = 90 - 180 \text{ м}^2/\text{г}$. Методами рентгеноструктурного аналізу ідентифіковано фазу Fe_3O_4 . Дослідженнями висушених зразків магнетиту методами атомної та магнітної силової мікроскопії показано, що вони схильні до утворення агрегатів, розмір яких досягає 500 нм. Магнітні властивості зразків вимірювали методами вібраційної магнітометрії на частоті 228 Гц при кімнатній температурі. Синтезований магнетит виявляв суперпарамагнітні властивості та однодоменну структуру [5].

Однодоменний стан магнітних наночастинок характеризується однорідністю намагніченості при любых значеннях і напрямках поля **H**, можливістю існування як у твердотільних феро- і ферімагнітних сплавах і сполуках, так і в рідких середовищах. Для намагнічування до насичення зразків суспензій однодоменних феромагнітних частинок, розподілених в діамагнітних матрицях, потрібні поля значно меншої напруженості, ніж у випадку багатодоменних. Створення в таких системах магнітної текстури, при якій осі легкого намагнічення частинок орієнтовані в одному напрямку (вісь текстури), призводить до збільшення намагніченості і коерцитивної сили.

Синтез нанокомпозитів $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$

Для одержання нанокомпозитів $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ модифікуванням поверхні магнетиту у якості модифікатора обрано тетраетоксисилан (ТЕОС). Структура кінцевих продуктів полімеризації при його перетвореннях в значній мірі залежить від умов проведення синтезу: температури, рН середовища, перемішування, наявності каталізаторів тощо.

Синтез покриття Si-O-Si з високим ступенем полімеризації на поверхні нанорозмірного однодоменого магнетиту здійснювали двома способами: хімічним модифікуванням (ХМ), за рахунок взаємодії груп OH^- поверхні магнетиту з ТЕОС [2]; та методом адсорбційного модифікування (АМ) [2, 3].

Хімічне модифікування проводили рідиннофазовим способом у толуолі [2]. При використанні методу хімічного модифікування товщина шару SiO_2 на поверхні магнетиту, за розрахунками реагентів, була близькою до мономолекулярного.

Для збільшенні вмісту шару SiO_2 до 0,2 г на 1 г поверхні магнетиту, застосовували метод адсорбційного модифікування поверхні полімером. Приєднання модифікатора відбувається в результаті утворення водневих зв'язків між силанольною групою модифікатора і гідроксильною групою поверхні магнетиту з подальшою молекулярною конденсацією з утворенням силоксанового покриття Si-O-Si за механізмом полімолекулярної конденсації.

Модифікування поверхні магнетиту *n*-бутилортотитанатом

Методика синтезу нанокомпозитів $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ заснована на реакції гідролізу *n*-бутилортотитанату та наступній конденсації продуктів гідролізу з утворенням полімерної сітки Ti-O-Ti. Гідроліз проходить достатньо швидко. Ступінь полімеризації і будова полімерів в значній мірі залежить від співвідношення ортотитанату та води, яка потрібна для досягнення бажаного ступеня гідролізу, умов синтезу гідролізу, наявності каталізаторів тощо. Хімічне модифікування проводили за методикою,

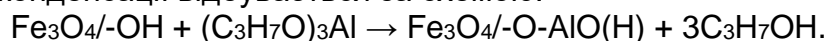
аналогічною описаній вище для ТЕОС. Товщина шару TiO_2 на поверхні магнетиту, за розрахунками реагентів, була близькою до молекулярного.

Одержання покриття Ti-O-Ti з вмістом 0,2 г на 1 г поверхні магнетиту виконували методом адсорбційного модифікування.

Модифікування поверхні частинок Fe_3O_4 ізопропілатом алюмінію

Хімічне модифікування поверхні наночастинок магнетиту проводили рідиннофазовим способом – ізопропілатом алюмінію $(\text{C}_3\text{H}_7\text{O})_3\text{Al}$ в ізопропіловому спирті. В результаті реакції поліконденсації поверхня магнетиту набуває амфотерного характеру за рахунок Al-O(H) -груп.

Реакція поліконденсації відбувається за схемою:



Методи досліджень

Адсорбційну ємність (A) на поверхні вихідного та модифікованого магнетиту щодо комплексів *цис-дихлордіамінплатини* визначали в перерахунку на концентрацію катіонів Pt^{2+} в розчинах до і після адсорбції із застосуванням атомно-абсорбційного методу (спектрофотометр С - 115 М, полум'яна суміші ацетилен-повітря, довжина хвилі $\lambda = 265,7$ нм). Для побудови ізотерм готували розчини з концентраціями 10 - 450 мг/л зі стандартного розчину цисплатину (розрахунки проводились на концентрацію Pt^{2+} -іонів). Адсорбцію здійснювали у динамічному режимі за кімнатної температури при значенні $\text{pH} = 8,6$.

Дослідження залежності адсорбційних властивостей наноструктур від pH здійснювались у динамічному режимі за кімнатної температури. Наважки адсорбентів (0,03 г) заливали розчином цисплатину ($C_{\text{Pt}^{2+}} = 42,0$ мг/л), $V = 5$ мл у діапазоні $\text{pH} = 4,6\text{--}10$. В якості буферного розчину використовували ацетатно-аміачний буфер. Потенціометричні вимірювання pH проводили за допомогою приладу І-160М.

Кінетику адсорбції *цис-дихлордіамінплатини* досліджували за такою схемою: наважки адсорбенту (0,03 г) заливали розчином цисплатину ($C_{\text{Pt}^{2+}} = 42,0$ мг/л), $V = 5$ мл при $\text{pH} = 7,0$ і через певний час вимірювали оптичну густину на атомно-адсорбційному спектрофотометрі та відповідно фіксували $C_{\text{рівн}}$ за калібрувальним графіком.

Концентрацію розчинів *цис-дихлордіамінплатини* для досліджень вибирали близькою до значень, які можуть бути характерними для медичних використань вказаного препарату.

Дослідження десорбції з поверхні синтезованих зразків здійснювали після попередньої адсорбції при $C_0 = 104,0$ мг/л, з початковим об'ємом води 40 мл в інтервалі 15–180 хв.

Оцінку біосумісності магнетиту, кремнезему, оксидів титану та алюмінію здійснювали за їх впливом на життєздатність клітин хлібопекарських дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*.

Життєздатність клітин визначали за допомогою динамічної методики реєстрації CO_2 , виділеного в процесі анаеробного дихання (бродиння) після взаємодії клітин з оксидами Fe_3O_4 ($S_{\text{пит}} \sim 180 \text{ м}^2\text{г}^{-1}$), SiO_2 (пірогенний, $S_{\text{пит}} \sim 280 \text{ м}^2\text{г}^{-1}$, виробництво КДЕЗ ІХП НАН України, м. Калуш), TiO_2 (виробництво фірми DUPONT, рутил R 960, W 38, LOT 382287, розмір частинок 0,5 мкм), Al_2O_3 (пірогенний, 96 $\text{м}^2\text{г}^{-1}$, КДЕЗ ІХП НАН України), а також цитохімічним методом.

Експериментальні результати свідчать про досить високу біосумісність клітин дріжджів з оксидами Fe_3O_4 , SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 . Після 5 діб життєздатність дріжджів у дослідних суспензіях Fe_3O_4 , TiO_2 знаходилась на рівні 90 %, а SiO_2 , Al_2O_3 – 95 %.

Для дослідження перетворень, що відбуваються на поверхні магнетиту при модифікуванні, застосовували метод інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії з Фур'є-накопиченням (спектрометр "Perkin Elmer", модель 1720X, діапазон 400 – 4000 cm^{-1}).

Результати та їх аналіз

Для досліджень синтезовано наступні типи зразків наноструктур:

1. Fe_3O_4 ;
2. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2(\text{XM})$ хімічним методом за реакцією поліконденсації;
3. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2(\text{AM})$ методом адсорбційного модифікування;
4. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2(\text{XM})$;
5. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2(\text{AM})$;
6. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

В ІЧ-спектрах вихідного (немодифікованого) магнетиту Fe_3O_4 (тип 1) виявлені смуги поглинання (СП) 400-422-440 cm^{-1} , що вказують на кристалічну структуру поверхні Fe_3O_4 , СП – 442, 480, 580, 550 – 582 та 640 cm^{-1} характеризують коливання зв'язків Fe-O поверхні наночастинок магнетиту. Смуги поглинання 895, 976, 1050 cm^{-1} та 1121 cm^{-1} належать деформаційним коливанням груп Fe-OH, СП 1655 cm^{-1} зумовлена деформаційними коливаннями молекул води, адсорбованої на поверхні магнетиту. Дифузна СП в діапазоні 2800–3500 cm^{-1} відповідає коливанням гідроксильних груп поверхні магнетиту і вказує на наявність водневих зв'язків.

ІЧ-спектри нанокомпозитів $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$, покриття яких одержано хімічним методом за реакцією поліконденсації (тип 2) та методом адсорбційного модифікування (тип 3). Смуги 1621 та 3423 cm^{-1} можуть бути віднесені до коливань зв'язків Н-О-Н вільної та адсорбованої води в напрямках розтягнення і вигину, відповідно. Максимум при 793 cm^{-1} відповідає Si-O-Si симетричним розтягненням. Максимуми СП 570 cm^{-1} та 893 cm^{-1} є показником наявності зв'язків Si-O-Fe. Смуги при 450 – 465 cm^{-1} відповідають Si-O-Si коливанням кремнезему. Інтенсивний дублет при 1032 cm^{-1} та 1108 cm^{-1} , який є характерним для полімерної структури Si-O-Si, підтверджує утворення шару з високим ступенем полімеризації. СП 1070, 798, 465 cm^{-1} характерні для каркасних коливань та зв'язків Si-O-Si в кремнеземі, 960 cm^{-1} – валентні коливання зв'язків Si-O в групі Si-OX (X – в більшості випадків H, або Me). Смуги поглинання 970, 1079 cm^{-1} належать коливанням у поверхневих шарах SiO_2 та свідчать про суцільне покриття $(\text{SiO}_2)_x$ поверхні магнетиту.

Експериментально встановлено, що мінімальна товщина шару, який забезпечує суцільне покриття поверхні магнетиту при використанні методу адсорбційного модифікування, є 0,15-0,18 г SiO_2 на 1 г поверхні магнетиту, або 1,5-1,8 мг SiO_2 на 1 m^2 магнетиту. Нагрівання нанокомпозитів вище 400°C призводить до незворотного дегідроксилування покриття SiO_2 , що є небажаним для адсорбентів. Показано, що маса шару покриття SiO_2 1,5-1,8 мг на 1 m^2 поверхні магнетиту значно підвищує термічну стабільність нанокомпозитів у порівнянні з немодифікованим магнетитом. Магнітні характеристики таких нанокомпозитів практично співпадають з відповідними для вихідного нанокристалічного магнетиту.

Аналіз ІЧ-спектрів зразків типу 4, 5 свідчить, що наявність суцільного покриття TiO_2 на поверхні магнетиту (зразки типу 5) призводить до суттєвих змін в спектрах відбиття. Так, спостерігається вузька СП в області 410 cm^{-1} ; чітка при 468 cm^{-1} , а також широка СП 500-560-680 cm^{-1} , що відповідають коливанням зв'язків Ti-O-Ti. СП при 3300-3400 cm^{-1} належить валентним коливанням гідроксильних груп адсорбованої води. СП від 1000 до 1150 cm^{-1} можуть належати поверхневим групам TiO_2 на поверхні магнетиту. Дана СП, найбільш ймовірно, належить поверхневим сполукам, що утворилися при взаємодії TiO_2 та магнетиту. СП при 1635, 1400 cm^{-1} ідентифікуються, як характерні для деформаційних коливань молекул води, адсорбованої на поверхні магнетиту.

Наноккомпозитам, одержаним адсорбційним модифікуванням (тип 5) з вмістом TiO_2 0,2 г на 1 г поверхні магнетиту, притаманна більш висока термостабільність (до 500°C), а їх магнітні характеристики мало змінюються, в порівнянні з відповідними для немодифікованого магнетиту. Апробацією наноккомпозитів, як адсорбентів для очистки плазми крові, встановлено, що наноккомпозити $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ адсорбують близько 80% вірусів везикулярного стоматиту.

В ІЧ-фур'є спектрах синтезованого наноккомпозиту типу 6 спостерігаються смуги, які відповідають за деформаційні коливання груп Al-O ($600 - 700 \text{ см}^{-1}$), а також валентні коливання Al-OH груп (СП $1400 - 1600 \text{ см}^{-1}$ і $2800 - 3000 \text{ см}^{-1}$), що свідчить про утворення структури $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$. Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії, рентгено-структурного аналізу та рентгенівської фотоелектронної спектроскопії вивчено склад та структуру одержаного наноккомпозиту. Встановлено, що в результаті синтезу на поверхні нанорозмірних частинок магнетиту утворюється фаза гідроксиду алюмінію. Показано, що після відпалювання зразку при 460°C відбувається перетворення гідроксидної фази алюмінію в фазу Al_2O_3 .

Експериментальні дані дослідження адсорбції комплексів *цис-дихлордіамінплатини* на поверхні синтезованих наноккомпозитів від pH розчину свідчать, що максимуми показника ємності для всіх поверхонь зміщені в зону лужного середовища (pH = 8,6-10).

Для побудови ізотерм використовували розчини цисплатини з концентраціями за іонами Pt^{2+} в діапазоні $C_0 = 7,75 - 444,0 \text{ мг/л}$ ($g = 0,03 \text{ г}$, $V = 5 \text{ мл}$, pH = 8,6). Ізотерми адсорбції комплексів *цис-дихлордіамінплатини* усіх наноккомпозитів, крім $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ з вмістом оксиду титану 0,2 г на г магнетиту (AM), вказують, що зростання рівноважної концентрації Pt^{2+} -іонів призводить до адсорбційного насичення моношару поверхні адсорбентів. Така форма ізотерм може бути описана рівнянням Ленгмюра, яке справедливе для адсорбентів з енергетично еквівалентними адсорбційними центрами.

Кінетичні дослідження свідчать, що основна частина *цис-дихлордіамінплатини* адсорбується на поверхнях усіх досліджених наноккомпозитів за перші 20-40 хвилин. Висока швидкість адсорбції може вказувати на відсутність в синтезованих наноккомпозитах значної пористої структури.

В табл. 1 наведено обчислені значення адсорбційної ємності A , мг/г (за катіонами Pt^{2+}), коефіцієнти розподілу (E , мл/г) та ступінь вилучення (R , %) наноструктур з різною хімічною природою поверхні.

Результати вказують, що полімерні покриття TiO_2 на магніточутливих носіях з нанорозмірного однодоменного Fe_3O_4 мають перевагу перед іншими дослідженими покриттями (SiO_2 , Al_2O_3) за адсорбційною ємністю, ступенем вилучення та коефіцієнтом розподілу *цис-дихлордіамінплатини*, вірогідно, за рахунок високої спорідненості комплексу *цис-платини* до гідрофобної поверхні оксиду титану. Найвищі показники адсорбції комплексів *цис-дихлордіамінплатини* виявляють наноккомпозити $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2(\text{AM})$ з розвинутою полімерною структурою Ti-O-Ti та близькою до оптимальної товщиною.

Поверхні Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ та $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ характеризуються досить близькими значеннями адсорбційних параметрів. Це може бути пов'язано з подібним характером природи їх поверхні та механізмів адсорбції, а саме, з наявністю гідроксильних груп та відповідними значеннями їх концентрації.

Таблиця 1. Адсорбційні характеристики синтезованих наноструктур з різною хімічною природою поверхні щодо *цис-дихлордіамінплатини*: $C_0 = 180 \text{ мг/л}$, $g = 30 \text{ мг}$, $V = 5 \text{ мл}$.

Тип наноструктури	Адсорбційна ємність A , мг/г	Коефіцієнт розподілу E , мл/г	Ступінь вилучення R , %
Fe_3O_4	11,58	105	38,0
$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2 (\text{XM})$	11,51	100	38,5

Fe ₃ O ₄ /SiO ₂ (AM)	12,16	117	41,3
Fe ₃ O ₄ /TiO ₂ (XM)	13,99	146	47,0
Fe ₃ O ₄ /TiO ₂ (AM)	25,87	1063	87,0
Fe ₃ O ₄ /Al ₂ O ₃	10,72	93	36,0

Вивчення десорбції *цис*-дихлордіамінплатини з поверхні нанокompозитів у модельне середовище (дистильована вода) показало, що вивільнення адсорбату з поверхні досліджених структур відбувається за перші 30 – 60 хвилин.

Вивільнення цисплатину з поверхні нанокompозитів Fe₃O₄/SiO₂ та Fe₃O₄/TiO₂ на 80 – 90 % відбувається за 20 – 30 хв.

Одержані результати можуть бути використані в розробках адсорбентів медико-біологічного і технічного призначення, зокрема, для вилучення комплексів Pt²⁺.

Висновки

Досліджено адсорбцію комплексів *цис*-дихлордіамінплатини магніточутливими наноструктурами з різною хімічною природою поверхні: Fe₃O₄, Fe₃O₄/SiO₂, Fe₃O₄/TiO₂, Fe₃O₄/Al₂O₃. Встановлено вплив способу модифікування поверхні Fe₃O₄ на адсорбцію комплексів Pt²⁺. Найкращі характеристики спостерігались у нанокompозитів Fe₃O₄/TiO₂, для яких оптимальним способом формування полімерного покриття Ti-O-Ti на поверхні магнетиту є адсорбційне модифікування. Вивчено ізотерми та кінетику адсорбції комплексів *цис*-дихлордіамінплатини (в перерахунку на іони Pt²⁺) на поверхні синтезованих наноструктур, а також її залежність від pH розчинів. Результати досліджень можуть бути використані при створенні адсорбентів медико-біологічного і технічного призначення, зокрема, для вилучення комплексів Pt²⁺ за їх малих концентрацій.

Література

1. M.C. Roco, R.S. Williams, P. Alivisatos. Nanotechnology research directions. Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade. – 2002. – V. 156. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 171 p.
2. Nanomaterials and Supramolecular Structures. Physics Chemistry, and Applications. A.P. Shpak, P.P. Gorbyk (eds.) – Springer. – 2009. – P. 63-78. – 425 p.
3. Наноматериалы и нанокompозиты в медицине, биологии, экологии. Под ред. А.П. Шпака, В.Ф. Чехуна. Составители П.П. Горбик, В.В. Туров. – К.: Наукова думка, 2011. – 444 с.
4. П. Горбик, С. Покутний. Современные проблемы физики и химии поверхности: Магниточувствительные нанокompозиты с функциями нанороботов и атомоподобные наноструктуры. – Palmarium Academic Publishing. – 2013. – 216 с.
5. Физико-химия наноматериалов и супрамолекулярных структур. Под ред. А.П. Шпака, П.П. Горбика. – К. Наукова думка. Т.1. – 2007. – С. 45-87. – 428 с.
6. П.П. Горбик, С.В. Горобець, М.П. Турелик, В.Ф. Чехун, А.П. Шпак. Біофункціоналізація наноматеріалів і нанокompозитів. Навчальний посібник. – К.: Наукова думка, 2011. – 283 с.

АДСОРБЦІЯ *ЦИС*-ДИХЛОРДІАМІНПЛАТИНИ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ НАНОКОМПОЗИТАМИ Fe₃O₄/SiO₂ (TiO₂, Al₂O₃)

А.П. Кусяк, С.П. Туранська, А.Л. Петрановська, П.П. Горбик

Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка Національної академії наук України,
вул. Генерала Наумова 17, Київ 03164, Україна

Досліджено процеси хімічного модифікування поверхні нанорозмірного однодоменого магнетиту тетраетоксисиланом, *n*-бутилортотитанатом та ізопропілатом алюмінію. Синтезовано нанокompозити Fe₃O₄/SiO₂, Fe₃O₄/TiO₂ і Fe₃O₄/Al₂O₃ на основі магнетиту, вивчено їх адсорбційні властивості щодо комплексів *цис*-дихлордіамінплатини в залежності від хімічної природи поверхні наноструктур. Вивчено ізотерми та кінетику адсорбції комплексів *цис*-

дихлордіамінплатини, в перерахунку на іони Pt^{2+} . Результати досліджень можуть бути використані при створенні магнітокерованих адсорбентів медико-біологічного і технічного призначення, зокрема, для вилучення малих концентрацій комплексів Pt^{2+} .

Ключові слова: адсорбція, цис-дихлордіамінплатина, магнетит, магніточутливі поліфункціональні наноккомпозити, магнітокеровані адсорбенти.

АДСОРБЦИЯ ЦИС-ДИХЛОРОДИАМИНПЛАТИНЫ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ НАНОКОМПЗИТАМИ Fe_3O_4/SiO_2 (TiO_2 , Al_2O_3)

А.П. Кусяк, С.П. Туранская, А.Л. Петрановская, П.П. Горбик

Институт химии поверхности им. А.А. Чуйка Национальной академии наук Украины,
ул. Генерала Наумова 17, Киев 03164, Украина

Исследованы процессы химического модифицирования поверхности наноразмерного однодоменного магнетита тетраэтоксисиланом, *n*-бутилортотитанатом и изопропилатом алюминия. Синтезированы наноккомпозиты Fe_3O_4/SiO_2 , Fe_3O_4/TiO_2 и Fe_3O_4/Al_2O_3 на основе магнетита, изучены их адсорбционные свойства по отношению к комплексам *цис*-дихлородиаминплатины в зависимости от химической природы поверхности наноструктур. Изучены изотермы и кинетика адсорбции комплексов *цис*-дихлородиаминплатины, в пересчете на ионы Pt^{2+} . Результаты исследований могут быть использованы при создании магнитоуправляемых адсорбентов медико-биологического и технического назначения, в частности, для извлечения малых концентраций комплексов Pt^{2+} .

Ключевые слова: адсорбция, цис-дихлородиаминплатина, магнетит, магниточувствительные полифункціональні наноккомпозити, магнитоуправляемые адсорбенты.

ADSORPTION OF *CIS*-DICHLORODIAMINEPLATINUM COMPLEXES BY MAGNETITE - SILICA (TITANIUM-, ALUMINIUM OXIDES) NANOCOMPOSITES

A.P. Kusiak, A.L. Petranovska, S.P. Turanska, P. P.Gorbyk,

*O. Chuiko Institute of Surface Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine,
17 General Naumov Str., 03164 Kyiv, Ukraine,*

The processes of chemical modification of nano-sized single-domain magnetite surface with tetraethoxysilane, *n*-butyl orthotitanate and aluminium isopropylate were researched. Fe_3O_4/SiO_2 , Fe_3O_4/TiO_2 and Fe_3O_4/Al_2O_3 nanocomposites based on magnetite were synthesized, their adsorption properties with respect to *cis*-dichlorodiamineplatinum complexes were investigated depending on chemical nature of the surface of nanostructures. Adsorption isotherms and kinetics of *cis*-dichlorodiamineplatinum complexes were studied in calculation onto Pt^{2+} ions. The research results can be used in developing magnetically directed adsorbents for medico-biological and technical purposes, in particular, for extraction of low concentration of Pt^{2+} complexes.

Keywords: *adsorption, cis-dichlorodiamineplatinum, magnetite, magnetosensitive polyfunctional nanocomposites, ma*